

스마트 무인기용 터보축 엔진의 성능진단을 위한 결함 예측에 관한 연구

박준철* · 노태성** · 최동환**

A Study on Defect Diagnostics for Health Monitoring of a Turbo-Shaft Engine for SUAV

Juncheol Park** · Taeseong Roh*** · Dongwhan Choi***

ABSTRACT

In this paper, health monitoring technique has been studied for performance deterioration caused by the defects of the gas turbine. The parameters for performance diagnostics have been extracted by using GSP program for modeling the target engine. The virtual sensor model for the health monitoring has been built of those data. The position and magnitude of the defects of the engine components have been determined by using Multiple Linear Regression technique and the method using the weight in order to diagnose the single and multiple defects.

초 록

본 연구에서는 가스 터빈 엔진의 결함에 의해 나타나는 엔진의 성능 저하를 진단하는 기법을 연구하였다. 대상 엔진을 모델화하기 위해 상용 프로그램 GSP를 이용하여 저하된 성능 진단을 위한 변수들을 추출하였으며 이를 바탕으로 Health Monitoring을 위한 Virtual Sensor Model을 구축하였다. 단일 결함과 복합 결함을 예측하기 위한 방법으로 Multiple Linear Regression 기법과 가중치를 이용한 기법을 도입하여 엔진 구성품의 결함 위치 및 결함 정도를 예측하였다.

Key Words: Multiple Linear Regression, Sensed Parameter(측정 변수), Health Monitoring Parameter(성능 변수), Hidden Layer(은닉층), Weight(가중치)

1. 서 론

가스터빈 엔진은 작동 시간이 경과함에 따라

성능이 저하되며 예기치 않은 사고로 내부 구성 부품의 결함이 발생하기도 한다. 따라서 적절한 성능진단 기법이 마련되어 있다면 구성 부품의 결함을 확인 또는 조기에 발견하여 수정함으로써 계획적인 정비를 가능하게 하여 정비비용을 절감할 수 있다.[4] 이렇게 효율적인 운용을 가

* 인하대학교 공과대학원 항공공학과
** 인하대학교 항공우주공학과
연락처, E-mail: pain-captain@hanmail.net

능하게 하는 성능 진단을 위해 본 연구에서는 엔진 구성품의 단일 혹은 복합 결함을 예측하기 위한 방법으로 Multiple Linear Regression 기법과 가중치를 이용한 기법을 제안하였으며 이러한 방법을 통하여 측정 변수(Sensed Parameter)만이 가질 수 있는 고유한 값들이 결함 예측에 결정적 단서를 제공할 수 있음을 밝혀내어 간단한 수치적 방법만으로 신뢰성 있는 고장 진단의 판단이 가능함을 보여주었다.

2. 본 론

2.1 Virtual Sensor를 통한 데이터 구축

엔진 성능 진단을 위해 구축해야 하는 성능 변수와 측정 변수들의 데이터들은 GSP 상용 프로그램을 이용하였다. 데이터를 얻는 방법은 우선 엔진이 정상적인 작동을 하고 있을 때의 정상 데이터를 획득한 뒤 엔진 구성품에 가상적인 결함을 임의로 주어 비정상적 데이터를 획득하였다. GSP 모델은 대상 엔진인 PWC206C의 정상정지상태 조건에서의 설계점 데이터로 정하였으며 구성품 Map은 GSP에서 제공하는 터보사프트엔진 Map을 사용하였다. 엔진에 임의의 결함을 주는 방법은 압축기, 압축기 터빈, 동력 터빈 각각의 구성품에 단일, 복합 결함(효율 저하)을 주어 그에 따른 비정상적 측정 변수들의 데이터베이스를 구축하였다. Table 1은 측정변수(Sensed Parameter)와 성능 변수(Health Monitoring Parameter)들의 구성을 보여주며 Table 2는 엔진 구성품에 임의로 결함을 주는 Defect 시나리오의 구성을 보여준다.

Table 1. Sensed Parameter and Health Monitoring Parameter

Sensed Parameter
$N_{ct}, N_{pt}, T_{t3}, P_{t3}, T_{t4}, P_{t4}, T_{t5}, P_{t5}, T_{t6}, P_{t6}, \dot{W}_f, SHP$
Health Monitoring Parameter
$\eta_c, \eta_{ct}, \eta_{pt}$

Table 2. Defect Scenario

Scenario	η_c	η_{ct}	η_{pt}
1	-0.5~-5.5%	0%	0%
2	0%	-0.5~-5.5%	0%
3	0%	0%	-0.5~-5.5%
4	-0.5~-5.5%	-0.5~-5.5%	0%
5	0%	-0.5~-5.5%	-0.5~-5.5%
6	-0.5~-5.5%	0%	-0.5~-5.5%
7	-0.5~-5.5%	-0.5~-5.5%	-0.5~-5.5%

2.2 단일 결함과 복합 결함의 판단

2.2.1 단일 결함 예측 기법

$$\begin{bmatrix} d\eta_c \\ d\eta_{ct} \\ d\eta_{pt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & a_{1,3} & \dots & a_{1,10} & a_{1,11} & a_{1,12} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & a_{2,3} & \dots & a_{2,10} & a_{2,11} & a_{2,12} \\ a_{3,1} & a_{3,2} & a_{3,3} & \dots & a_{3,10} & a_{3,11} & a_{3,12} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} dN_{ct} \\ dN_{pt} \\ dT_{t3} \\ dP_{t3} \\ dT_{t4} \\ dP_{t4} \\ dT_{t5} \\ dP_{t5} \\ dT_{t6} \\ dP_{t6} \\ dW_f \\ dSHP \end{bmatrix}$$

Fig. 1 Matrix Form Using the Multiple Linear Regression Technique

단일 결함을 예측하는 것은 Multiple Linear Regression 기법을 이용해 Matrix 계수를 구해내어 예측할 수가 있다. Fig. 1은 계수를 구하기 위한 Matrix 형태이다. 이 방법은 측정변수들의 선형 조합이 단일 구성품의 효율 저하를 결정한다는 것과 각 구성품의 효율 저하는 각각 독립적이라는 가정이 들어가 있다. 또한 이러한 선형 조합만을 가지고 단일 효율을 정확하게 예측하기 위해선 실제 엔진의 정확한 엔진 구성품 Map을 필요로 하게 된다. 따라서 2가지 이상의 복합 결함을 예측하기 위해서 가장 중요한 것은 각 구성품의 결함이 성능변수와 측정변수에 모두 영향을 미친다는 가정을 하고 접근해야 한다는 것이다. 단일 결함은 복합 결함의 관점에서 보면 다른 구성품의 결함이 없다는 것이다. 즉, Multiple Linear Regression 방법에 의해 단일 결함을 정확하게 예측이 가능하다는 것은 다른 구성품의 결함이 없다는 것을 알고 있는 경우이거나 다른 구성품의 결함이 있다고 해도 그 결

함의 정도를 안다면 단일 구성품의 결함이 예측이 가능하다는 것이다. Table 3은 단일 결함과 복합 결함의 경우 위 방법으로 예측이 가능한지를 보여준다.

Table 3. Diagnostic Probability of the Single or Multiple Defects by Using the Multiple Linear Regression Technique

	$d\eta_c$	$d\eta_{ct}$	$d\eta_{pt}$	예측 유무
단일	-3%	0%	0%	예측 가능
단일	0%	-3%	0%	예측 가능
단일	0%	0%	-3%	예측 가능
복합	-3%	-2%	0%	예측 불가능
복합	-3%	0%	-1%	예측 불가능
복합	-3%	-2%	-1%	예측 불가능

2.2.2 복합 결함 예측 기법

복합적인 구성품의 결함 예측은 결함에 대한 측정 변수들의 민감도 분석을 통해 접근할 수 있다. 이것은 구성품의 결함에 대해 지배적으로 영향을 받는 측정 변수들의 선별에서 시작한다.

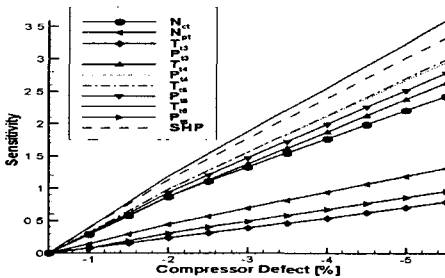


Fig. 2 Sensitivity of the Sensed Parameter according to Compressor Defect

Figure 2는 압축기터빈의 효율 저하 -2% 일 때 압축기의 효율 저하에 따른 측정 변수들의 민감도이다. 기울기는 민감도의 정도를 나타내며 T_{65} , SHP , P_{63} 가 높은 민감도를 보이며 T_{63} , P_{66} , N_{pt} 가 상대적으로 낮은 민감도를 보이고 있다. 따라서 낮은 민감도를 보이는 측정 변수에 더 큰 가중치를 두고 해석하면 복합 결함에서 각각의 단일 결함을 판별해 내는데 결정적인 변수로 이용할 수가 있다.

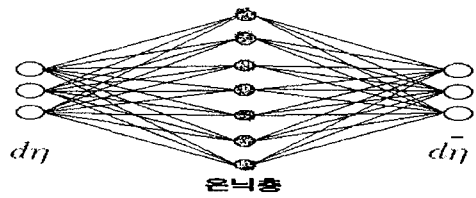


Fig. 3 Difference between Input and Output Defect caused by a Hidden Layer

Figure 3은 실제로 상용 프로그램에서 임의의 효율 저하($d\eta$)를 주었을 때 은닉층에 의해 다른 효율 저하($d\etā$)가 나타남을 보여주며 $d\etā$ 는 복합 결함을 판단하는 중요한 변수로 이용될 수 있다. 아래 식은 민감도 분석을 통한 가중치와 은닉층에 의한 압축기터빈의 효율 저하($d\eta_{ct}$)를 이용하여 X , Y 라는 결함 예측 변수를 만들어 낸 것이다. $H>G>F>E>D>C>B>A$ 의 순으로 가중치를 부여하며 K 는 압축기터빈의 효율 저하의 크기를 키우기 위한 가중치로서 Y 값에 비해 너무 작지 않도록 설정해 준 것이다.

$$X = Kd\eta_{ct}$$

$$Y = AdT_{65} + BdSHP + CdT_{63} + DdP_{63} + EdP_{65} + FdN_{ct} + GdN_{pt} + HdP_{66}$$

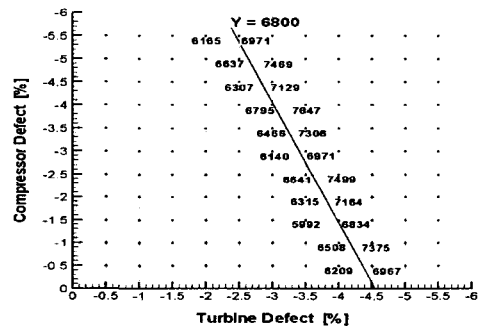


Fig. 4 Numberless Combination of the Compressor and Turbine Defect Set

Figure 4는 복합 결함을 예측하기 위한 방법을 설명하기 위한 예로 Y 값이 6800이 나왔을 경우 직선상에는 무수히 많은 복합 결함의 조합 (η_c, η_{ct})이 있음을 보여준다. 따라서 이러한 무수히 많은 조합 중에서 하나의 결함 조합으로 결

정할 수 있으려면 또 다른 변수인 X의 값이 필요하게 된다. Fig. 5는 측정 변수들에 의해 계산된 X, Y 값에 의해 압축기와 압축기 터빈의 Defect를 결정할 수 있는 Defect Diagnostic Map을 보여준다. 총 11개의 직선은 압축기터빈의 효율 저하를 -0.5%~-5.5%로 증가시킨 것이고 각 직선은 압축기 효율 저하를 -0.5%~-5.5%로 증가시킨 것이다. 이렇게 측정변수만이 가질 수 있는 고유한 X, Y값을 찾아내면 실제 은닉층을 거치지 않은 압축기와 압축기터빈의 효율 저하를 각각 찾아 낼 수 있다. 그러나 오른쪽 윗부분에서 압축기의 효율 저하에 따른 Y값이 비선형적으로 증가하는 영역을 볼 수 있는데 이것은 압축기의 결함을 예측하는 것이 터빈의 결함을 예측하는 것보다 어렵다는 것을 보여준다. 따라서 추출한 데이터베이스가 많을수록 압축기 결함의 경향성을 보다 정확하게 판단할 수 있을 것이다.

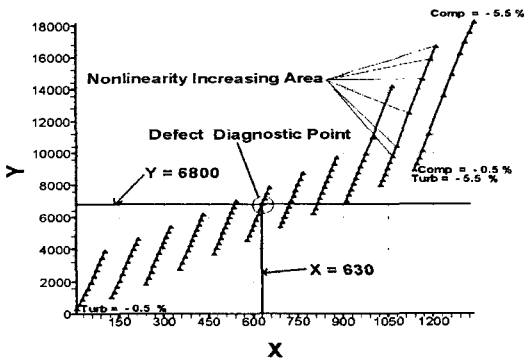


Fig. 5 Multiple Defect Diagnostic Map Using the Weight Technique

3. 결 론

본 논문에서는 가스터빈 엔진의 복합결함을 예측하기 위해 Multiple Linear Regression 기법과 측정변수의 민감도에 따라 가중치를 적용하는 기법을 시도하였다. 가중치를 이용한 기법은 Virtual Sensor로부터 얻어낸 측정변수(Sensed Parameter)들만이 가지는 고유한 변수 X, Y 값을

획득하여 복합 결함을 판단할 수 있는 결정적으로 이용한 기법이다. 그러나 엔진의 구성품 Map에 의하여 Defect Diagnostic Map에서 비선형성을 보이는 영역이 발생하였고 이러한 영역에서 터빈에 비해 압축기 결함을 정확하게 예측하는 것에 무리가 있었다. 때문에 압축기의 결함 예측을 위해서는 보다 많은 데이터베이스가 요구되며 그 경향성을 정확히 판단하는 것이 중요하다. 따라서 가스터빈엔진의 결함으로 인한 측정변수들의 비선형성이 증가되는 영역을 더 정확히 예측할 수 있다면 본 연구에서 제안된 복합적인 고장 진단 기법의 신뢰성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 김석균, Riti Sin호, 공창덕, "신경회로망의 가스터빈 엔진 성능 진단 적용", 한국항공우주학회지, 제27권, 제6호, pp.88-95
2. 공창덕, 고성희, 기자영, "신경회로망을 이용한 가스터빈 엔진의 지능형 성능진단에 관한 연구", 한국항공우주학회지, 제32권, 제3호, pp.51-57
3. 김수미, 오세윤, 홍용식, "산업용 가스터빈의 실제적인 부분부하 성능예측방법", 항공우주학회지, 제23권, 제3호, pp.57-63
4. 추동호, "가스터빈엔진의 실용적인 성능진단 기법 개선", 인하대학교 대학원 항공공학과, 1997
5. 김인철, "가스터빈엔진 모듈의 성능저하 경향성 분석 및 응용에 관한 연구", 인하대학교 대학원 항공공학과, 1998
6. Grewal, M.S., "Gas Turbine Engine Performance Deterioration Modeling and Analysis.", Ph.D Thesis, Cranfield Institute of Technology, England, 1988
7. 오세윤, "가스터빈 엔진 탈설계 성능예측방법의 연구", 인하대학교 항공공학과 석사학위논문, 1993